

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Student:

Dominik Žinić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Željku Šitumu na omogućenom pristupu elektro-hidrauličkom servo sustavu, za njegovu stručnu pomoć, potporu i razumijevanje pri izradi ovog završnog rada.

Zahvaljujem se gospodinu Andreju Drozgu iz tvrtke National Instruments za posuđeni uređaj CompactRIO 9076, module NI 9221, NI 9263, NI 9474 te ispravljač od 24 V bez kojih izvedba ovog rada ne bi bila moguća. Također mu se zahvaljujem na konstantnoj tehničkoj podršci i razumijevanju za ovaj rad.

Zahvaljujem se Prof. dr. sc. Zoranu Luliću na posuđenom modulu NI 9401.

Dominik Žinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DOMINIK ŽINIĆ**

Mat. br.: 0035178480

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **REGULACIJA BRZINE VRTNJE HIDRAULIČKOG MOTORA POMOĆU UPRAVLJAČKOG UREĐAJA CompactRIO**

Naslov rada na engleskom jeziku: **SPEED CONTROL OF A HYDRAULIC MOTOR USING THE CompactRIO CONTROLLER**

Opis zadatka:

Hidraulički servosustavi uobičajeno se sastoje od aktuatora (hidromotor ili hidraulički cilindar) i elektrohidrauličkog servorazvodnika koji se napaja radnim fluidom iz izvora hidrauličke energije. Suvremeni proizvodni procesi traže rješenja koja imaju mogućnost programiranog upravljanja gibanjem i/ili silom aktuatora, kao i mogućnost brze prilagodbe upravljačkih algoritama novim zahtjevima u tehnološkom procesu. Budući da se hidraulički sustavi vrlo često primjenjuju i u teškim radnim uvjetima, potrebno je imati upravljačke uređaje koji su robustni, brzi i pouzdani. Mjerno-upravljački uređaj CompactRIO (engl. Compact Reconfigurable Input/Output) omogućuje rad algoritma u stvarnom realnom vremenu. Uređaj je opremljen FPGA čipom (engl. Field-Programmable Gate Array), što mu omogućava programirljivost, robustnost, te brz rad s ulaznim i izlaznim signalima. Za izradu upravljačkih algoritama koristi se grafički programski jezik LabVIEW. Time se na jednostavan način ostvaruje otvorena i intuitivna platforma za provedbu postupka mjerenja i testiranja uređaja, za zadatke automatizacije sustava, te vizualizaciju i nadzor postrojenja i procesa.

U zadatku je potrebno:

- Ukratko opisati način programiranja i rada u programskom paketu LabVIEW.
- Dati tehnički opis laboratorijskog sustava za regulaciju brzine vrtnje hidrauličkog motora kao objekta upravljanja.
- Izraditi upravljačke programe za izvođenje algoritma na uređaju CompactRIO za regulaciju brzine vrtnje hidrauličkog motora.
- Izraditi grafičko sučelje za vizualizaciju i nadzor procesa.
- Razvijene upravljačke algoritme ispitati na eksperimentalnom postavu.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Željko Šitum

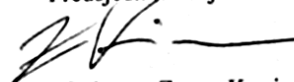
Rok predaje rada:

- 1. rok: 15. veljače 2013.
- 2. rok: 11. srpnja 2013.
- 3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
- 2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
- 3. rok: 18., 19. i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. OPIS SUSTAVA	4
2.1. Energetski dio servo sustava	6
2.2. Upravljački dio servo sustava	8
2.3. Izvršni dio servo sustava	11
2.4. Mjerni dio servo sustava	14
2.5. Upravljački uređaj NI CompactRIO	15
2.6. Upravljačko računalo	19
2.7. Konačna konstrukcija sustava	19
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE	21
3.1. Izrada upravljačkog programa	21
3.2. Rezultati ispitivanja	29
4. ZAKLJUČAK	32
LITERATURA	33
PRILOZI	34

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Shema rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava	5
Slika 2.2	Elektromotor <i>Siemens</i> serije <i>1LA7</i>	6
Slika 2.3	Frekvencijski pretvarač <i>Siemens</i> <i>Synamics G-110</i>	7
Slika 2.4	Proporcionalni tlačni ventil <i>Atos</i> serije <i>RZMO</i>	9
Slika 2.5	Servo ventil <i>Schneider</i> <i>HVM 061</i>	9
Slika 2.6	Presjek serije <i>DHI</i> elektromagnetskih ventila proizvođača <i>Atos</i>	10
Slika 2.7	Hidromotor <i>LöSi</i> <i>HK-EPMM 008 C</i> ugrađen u sustav	12
Slika 2.8	Hidraulička crpka <i>ViVOLO</i> serije <i>XV-1P</i>	13
Slika 2.9	Hidraulička crpka za terećenje ugrađena u sustav	13
Slika 2.10	Senzor tlaka <i>Siemens</i> <i>Sytrans P</i> serije <i>Z</i>	14
Slika 2.11	Upravljački uređaj <i>NI CompactRIO 9076</i>	16
Slika 2.12	Analogni ulazni modul <i>NI 9221</i>	17
Slika 2.13	Analogni izlazni modul <i>NI 9263</i>	18
Slika 2.14	Digitalni izlazni modul <i>NI 9474</i>	18
Slika 2.15	Digitalni ulazni modul <i>NI 9401</i> (sa brojačima impulsa)	19
Slika 2.16	Modul rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava	20
Slika 3.1	LabVIEW blok dijagram	22
Slika 3.2	LabVIEW korisničko sučelje	22

Slika 3.3	Vremenska „While“ petlja sa blokovima iz <i>PID Toolbox-a</i>	23
Slika 3.4	Regulacijska petlja	24
Slika 3.5	Zadavanje reference	25
Slika 3.6	Dodavanje vremenskih ograničenja	26
Slika 3.7	Spajanje signala sa senzora tlaka	27
Slika 3.8	Stvaranje tipki na različitim razinama kôda	28
Slika 3.9	Dodatni grafovi za vidljiviji prikaz rezultata	28
Slika 3.10	Grafičko sučelje nakon izvršenog programa	29
Slika 3.11	Odaziv u odnosu na referentnu brzinu	30
Slika 3.12	Oblik izlaznog signala iz regulatora	30
Slika 3.13	Ponašanje tlakova u ovisnosti o opterećenju	31

POPIS TABLICA

Tablica 1: Parametri regulatora	24
Tablica 2: Zadane reference vremena i brzine vrtnje	25

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$U_{M,N}$	V	nazivni napon elektromotora
$I_{M,N}$	A	nazivna struja elektromotora
f_M	Hz	frekvencija ulaznog napona elektromotora
$n_{M,N}$	okr/min	nazivni broj okretaja elektromotora
V_C	$m^3 (cm^3)$	radni volumen crpke
$Q_{C,max}$	$m^3/s (l/min)$	maksimalni protok crpke
$f_{pretv.}$	Hz	izlazna frekvencija frekvencijskog pretvarača
$p_{R,max}$	Pa (bar)	maksimalni regulirani tlak proporcionalnog ventila
$p_{R,min}$	Pa (bar)	minimalni regulirani tlak proporcionalnog ventila
$p_{P,max}$	Pa (bar)	maksimalni tlak tlačnog voda proporcionalnog ventila
$p_{T,max}$	Pa (bar)	maksimalni tlak povratnog voda proporcionalnog ventila
Q_{max}	$m^3/s (l/min)$	maksimalni protok proporcionalnog ventila
p_N	Pa (bar)	nazivni pad tlaka servo ventila
Q_N	$m^3/s (l/min)$	protok servo ventila pri nazivnom padu tlaka
p_1	Pa (bar)	tlak namješten na sigurnosnom tlačnom ventilu
v_{HM}	m^3/rad	specifični protok hidrauličkog motora

$n_{\text{HM,N}}$	okr/min	nazivna brzina vrtnje hidrauličkog motora
T_{max}	N m	maksimalni okretni moment hidrauličkog motora
$Q_{\text{HM,max}}$	m ³ /s (l/min)	maksimalni protok hidrauličkog motora
p_{max}	Pa (bar)	maksimalni radni tlak hidrauličkog motora
v_{DC}	m ³ /rad (cm ³ /okr)	specifični protok dodatne crpke
$Q_{\text{DC,max}}$	m ³ /s (l/min)	maksimalni protok dodatne crpke
T_{Sampling}	s (ms)	vrijeme uzorkovanja CompactRIO uređaja

SAŽETAK

U ovom završnom radu načinjen je eksperiment regulacije brzine vrtnje hidrauličkog motora promjenom protoka kroz elektro-hidraulički servo ventil. Protok se podešava pomoću uređaja CompactRIO. CompactRIO izvršava kôd izrađen u programu LabVIEW proizvođača National Instruments. LabVIEW je grafički programski jezik koji se koristi najčešće za testiranje, vizualizaciju, nadzor, prikupljanje i obradu podataka. Također se koristi za upravljanje i regulaciju, kako krajnje jednostavnih, tako i vrlo složenih sustava. Programi izrađeni u LabVIEW-u zovu se VIs (Virtual Instruments). Svaki VI se sastoji od prednje ploče (Front Panel) i od blok dijagrama (upravljačkog dijela). Prednja ploča, odnosno grafičko sučelje je onaj dio koji korisnik vidi kada je sustav pokrenut. LabVIEW je razvijen kao software koji će znanstvenicima i inženjerima olakšati i ubrzati razvoj proizvoda ili procesa, tako da ne gube mnogo vremena na razvoj programa, nego mogu više pažnje posvetiti samom proizvodu ili procesu.

Korišteni upravljački uređaj – CompactRIO je uređaj baziran na FPGA (Field Programmable Gate Array) tehnologiji, što mu omogućuje izvršavanje više paralelnih radnji, pomoću stotina tisuća integriranih logičkih sklopova čije se veze mogu programirati, tako da može istovremeno izvoditi npr. prikupljanje podataka, komunikaciju, vizualizaciju i proračun. Kada bi se iste radnje pokušale izvoditi na računalu sa procesorom koji radnje izvršava sekvencijalno, RAM memorija bi se brzo napunila, pa bi konstantno postajalo neko kašnjenje te na zaslonu vjerojatno ne bi bilo moguće prikazati više od jednog dijagrama. Postoji mogućnost da CompactRIO radi sam (Embedded system), kao PLC, ili u vezi s računalom. Ovaj završni rad bit će izveden povezivanjem CompactRIO uređaja sa prijenosnim računalom zbog vizualizacije i interakcije s korisnikom.

Ključne riječi:

CompactRIO; LabVIEW; elektro-hidraulika; servo; regulacija

SUMMARY

In this final thesis an experiment of hydraulic motor rotation speed regulation by modifying flow rate through electro-hydraulic servo valve has been made. Flow rate modification is done with help of CompactRIO device. CompactRIO executes the code built in National Instruments' LabVIEW software. LabVIEW is a graphical programming language which is most commonly used in testing, visualisation, supervision, data acquisition and data processing. It is also used for control and regulation, from extremely simple to very complex systems. Programs built in LabVIEW are called Vis (Virtual Instruments). Every VI is composed of Front Panel and Block Diagram (coding part). Front panel, i.e. graphical user interface (GUI) is the part that user looks at when system is on. LabVIEW was developed as a software which is supposed to facilitate and accelerate development of product or process, so scientists and engineers won't lose too much time on program development, but to pay more attention to product or process.

Control device that is used – CompactRIO, is a device based on FPGA (Field Programmable Gate Array) technology, which allows it to execute more parallel jobs, with assistance of hundreds of thousands integrated logical gates of which connections can be programmed, so e.g. data acquisition, communication, visualisation and calculation can be executed simultaneously. If the same jobs would be tried to be done on a computer with sequential processor, RAM memory would soon be filled up, so there would constantly be some sort of latency and it probably wouldn't be possible to show more than one diagram on the screen. There is an option for CompactRIO to be used by itself (Embedded system), like PLC, or connected to a computer. This final thesis will be done by connecting CompactRIO device to a laptop because visualisation and user interaction is needed.

Key words:

CompactRIO; LabVIEW; electro-hydraulics; servo; control

1. UVOD

Hidraulički i pneumatski sustavi zovu se zajedničkim imenom sustavi fluidne tehnike. Te vrste sustava zahtijevaju fluid kao radni medij. Kod pneumatike je radni medij zrak ili neki drugi plin, a kod hidraulike je to ulje ili voda. U ovom radu će se promatrati hidraulički sustav (hidraulički motor) sa uljem kao radnim medijem, upravljan elektronički. Takav sustav zove se elektro-hidraulički sustav. Obzirom da se za upravljanje koristi servo ventil, sustav se tada zove elektro-hidraulički servo sustav.

Hidraulički sustavi se danas često primjenjuju jer hidraulički elementi imaju veliku gustoću snage, odnosno, s aktuatorima malih dimenzija je moguće postići velike snage, što nije slučaj kod električnih strojeva. Nekad se koristila samo konvencionalna hidraulika, gdje se hidrauličkim elementima upravljalo isključivo ručno upravljanim razvodnicima, međutim, sve češćom uporabom upravljačke elektronike krenuo je i razvoj elektro-hidraulike, prvenstveno elektromehaničkih razvodnika. Kako je pomoću elektromehaničkih razvodnika bilo izvedivo samo propuštanje tekućine i blokiranje protoka tekućine, nije bilo moguće fino podešavati protok. Zbog toga su se razvile proporcionalna i servo hidraulika. Primjenom proporcionalnih elektromagnetskih ventila omogućena je promjena protoka, međutim, kod njih se javlja histereza, odnosno, odstupanje od željene vrijednosti pri porasu i padu upravljačkog signala, mjereno pri istoj vrijednosti upravljačkog signala. Servo ventili imaju unutarnju povratnu vezu, koja može biti mehanička, električna ili tlačna, pa time daju mogućnost finog podešavanja protoka. Stoga se proporcionalni ventili koriste više za periodičke ili manje precizne promjene protoka, a servo ventili za stalne promjene protoka, naročito za regulaciju. Na korištenom sustavu nalaze se jedan elektromagnetski ventil, jedan proporcionalni ventil i jedan servo ventil, a svaki ima zasebnu namjenu unutar sustava.

Kao što je već spomenuto, hidraulički sustavi imaju veliku gustoću snage, a korištenjem električnih servo ventila, elektro-hidraulički servo sustavi imaju široku primjenu. Koriste se u proizvodnji (npr. preše za lim), energetske postrojenjima (npr. promjena velikog protoka vode na vodenim provodnicama hidroelektrana pomoću cilindrom pokretanih vrata), automobilima (servo upravljači) itd.

Prednosti elektro-hidrauličkih servo sustava su [1]:

- prijem i prijenos upravljačkih signala na velike udaljenosti žičnim ili daljinskim putem
- jednostavno ostvarivanje povratne veze senzorima
- lako mijenjanje pojačanja regulacijskog kruga
- uključivanje elektro-hidrauličkih servo sustava kao izvršne elemente drugih sustava za automatsko upravljanje zbog mogućnosti prijema signala vrlo male snage na ulazu servo sustava
- ostale vrste motora i strojeva ograničene su dozvoljenim zagrijavanjem, dok kod hidrauličkih komponenti to nije slučaj, jer radni medij preuzima generiranu toplinu i odnosi je od komponenata što omogućuje da hidrauličke komponente budu male i lagane
- radni medij djeluje i kao mazivo te se na taj način dodatno produljuje životni vijek trajanja hidrauličkih komponenata
- hidraulički aktuatori (motori i cilindri) imaju krute karakteristike momenata i veliku specifičnu snagu

Nedostaci elektro-hidrauličkih servo-sustava su [1]:

- proizvodnja hidrauličkih komponenata zahtijeva vrlo uske tolerancije što rezultira visokom cijenom hidrauličkih komponenti
- otežano je i ograničeno upravljanje ovakvim sustavima zbog nelinearnosti i promjenjivosti parametara unutar hidrauličkog i mehaničkog dijela sustava. Time je i otežano izvođenje točnog matematičkog modela sustava. Nelinearnost hidrauličkog dijela prouzročena je nelinearnom karakteristikom protoka fluida kroz razvodnik u zavisnosti od korisnog pada tlaka i pomaka klipa razvodnika
- ovi sustavi nisu linearni, fleksibilni, precizni i jeftini kao električni i/ili elektromehanički uređaji kada se radi o upravljanju malim signalima (teretima)
- radni medij ili hidrauličko ulje tijekom rada postaje kontaminirano te sadrži čestice koje abrazivno djeluju na skupe hidrauličke komponente. Održavanje definira točno određen vremenski period nakon kojeg se mijenja ulje u sustavu, gdje se pojavljuje i problem odlaganja staroga ulja.

Navedene karakteristike čine ove sustave jedinstvenim i nezamjenjivim, pogotovo kada se radi o upravljanju velikim inercijskim teretima uz postizanje visoke točnosti odziva sustava. Zbog toga i postoji veliki interes za primjenu ovih sustava u različitim granama industrije, pa su navedeni neki primjeri primjene servo hidraulike: na civilnim i ratnim zrakoplovima još uvijek dominiraju elektro-hidraulički servo sustavi, autopiloti velikih trgovačkih i ratnih brodova, kod industrijskih robota pogotovo kada se radi o rukovanju predmetima mase veće od 100 kg, numerički upravljani radni strojevi, u automobilskoj industriji, u građevinskim strojevima i vozilima, industriji čelika, papira, kemijskoj i procesnoj industriji, kao i u poljoprivredi. [1]

2. OPIS SUSTAVA

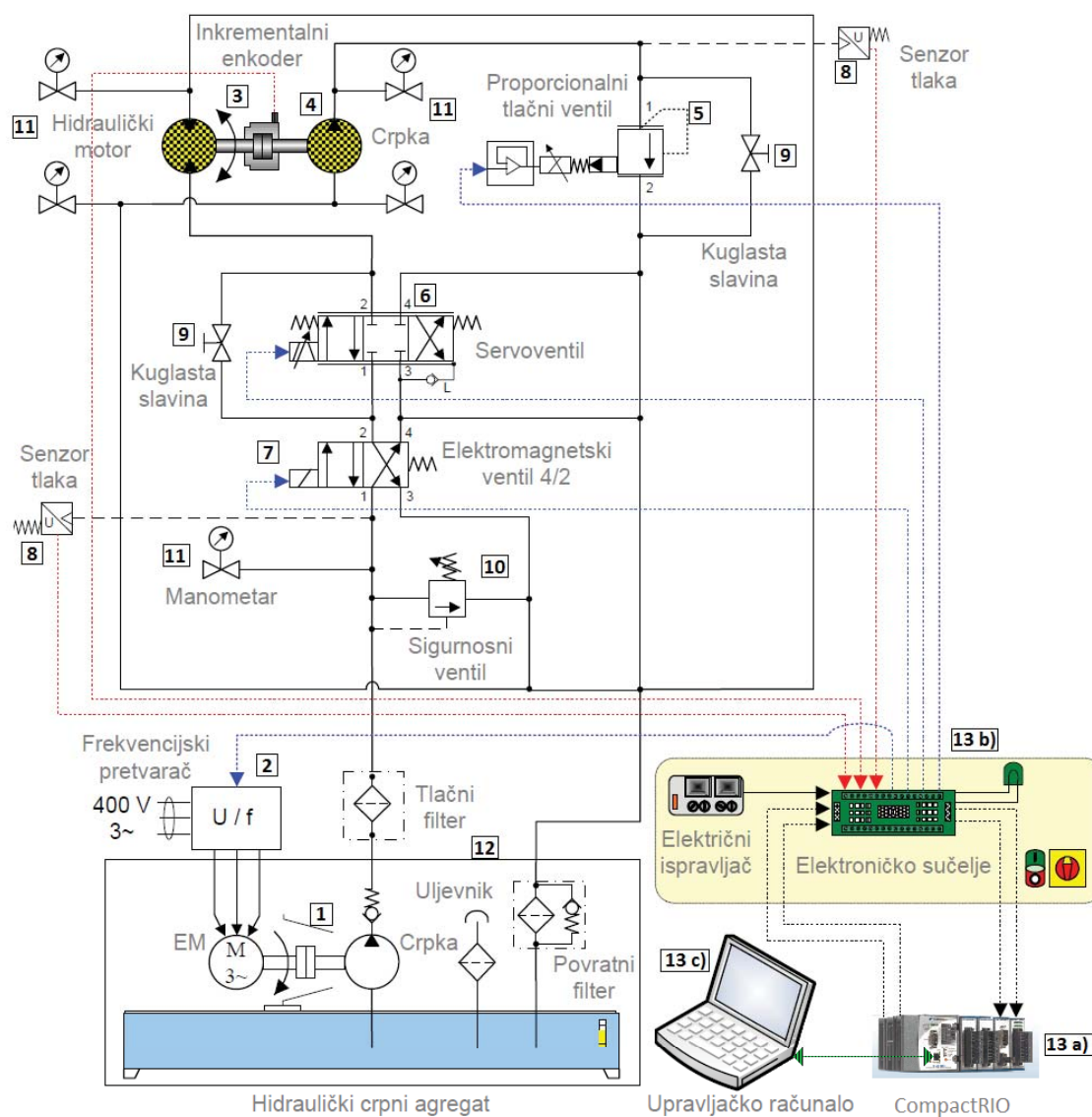
Kao i svaki regulacijski krug, ovaj sustav se sastoji od četiri osnovna elementa:

- mjerni član: inkrementalni enkoder
- regulacijski član: CompactRIO
- izvršni član: servo ventil
- objekt upravljanja: hidraulički motor

Elektro-hidraulički servo sustav (Slika 2.1) korišten u ovom završnom radu se sastoji od:

1. Hidrauličke crpke pokretane trofaznim elektromotorom čiji je ulazni napon doveden sa frekvencijskog pretvarača.
2. Frekvencijskog pretvarača koji radi u dva različita „moda“: Parametar 702, Mod 10 – konstantna frekvencija od 50 Hz; Parametar 702, Mod 16 – promjenjiva frekvencija od 0 do 50 Hz.
3. Hidrauličkog motora sa inkrementalnim enkoderom na izlaznom vratilu
4. Dodatne hidrauličke crpke čije je pogonsko vratilo spojkom vezano na izlazno vratilo hidrauličkog motora.
5. Proporcionalnog tlačnog ventila koji je spojen na izlaz dodatne hidrauličke crpke. Taj ventil u kombinaciji sa dodatnom hidrauličkom crpkom oponaša teret.
6. Servoventila kojim se upravlja promjenom protoka prema hidrauličkom motoru.
7. Elektromagnetskog ventila 4/2 koji služi kao programabilno osiguranje. U slučaju nužde, moguće je zaustaviti protok ulja kroz sustav, pomoću korisničkog sučelja na računalu.
8. Dva senzora tlaka: jedan na izlazu pogonske crpke i jedan na izlazu dodatne crpke. Oni služe za nadzor i za proučavanje sustava u pogonu.
9. Dvije kuglaste slavine koje služe kao „bypass“, odnosno premosnice ulja ukoliko se ne koriste ventili s kojima su paralelno spojene.
10. Sigurnosnog ventila koji služi kao zaštita od prevelikog tlaka ulja u sustavu.

11. Manometara koji služe za provjeru tlakova u sustavu.
12. Tri filtra ulja. Obzirom da je korišten servo ventil, vrlo je opasno imati nečistoće u sustavu.
13. Upravljačkog dijela:
 - a) Uređaja CompactRIO
 - b) Elektroničkog ormara
 - c) Upravljačkog računala



Slika 2.1 Shema rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava

2.1. Energetski dio servo sustava

Hidraulička crpka

Korištena hidraulička crpka pogonjena je kaveznim trofaznim asinkronim elektromotorom snage 2.2 kW, proizvođača Siemens (model 1LA7196 - 4AA11, Slika 2.2). Motor nazivnog napona $U_{M,N} = 230/400$ V (Δ / Y) i nazivne struje $I_{M,N} = 8.2/4.7$ A pri frekvenciji ulaznog napona $f_M = 50$ Hz dostiže maksimalnu brzinu vrtnje $n_{M,N} = 1420$ okr/min. Radni volumen crpke iznosi $V_C = 4.9$ cm³ = $4.9 \cdot 10^{-6}$ m³, pri čemu prema izrazu

$$Q_{C,max} = V_C \cdot n_{M,N} = 4.9 \cdot 10^{-6} \cdot 1420/60 = 1.16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 6.96 \text{ l/min} \quad (2.1)$$

maksimalni protok crpke iznosi 6.96 l/min.



Slika 2.2 Elektromotor Siemens serije 1LA7

Frekvencijski pretvarač

Korišteni frekvencijski pretvarač, Synamics G-110 (Slika 2.3) proizvođača Siemens, ima jedan rezervirani analogni ulaz koji služi za promjenu frekvencije napona koji se šalje na motor crpke. Taj analogni ulaz je moguće deaktivirati u slučaju da je potrebna konstantna vrijednost frekvencije izlaznog napona. To je vrlo jednostavno za izvesti namještanjem parametra P0702 u vrijednost 10. Tada je frekvencija izlaznog napona fiksna ($f_{\text{pretv.}} = 50$ Hz). Ta postavka se koristi u slučaju kada se koristi servo ventil kao izvršni član regulacije brzine vrtnje. U drugom slučaju, kada se ne bi koristio servo ventil (otvorena kuglasta slavina paralelno servo ventilu), parametru P0702 dodjeljuje se vrijednost 16. Tada se aktivira analogni ulaz frekvencijskog pretvarača, te se pomoću analognog signala u rasponu od 0 do 10 V frekvencija izlaznog napona mijenja u rasponu $f_{\text{pretv.}} = 0 \div 50$ Hz.



Slika 2.3 Frekvencijski pretvarač Siemens Synamics G-110

Filtri ulja

Filtri omogućuju normalan rad sustava i povećavaju njegovu trajnost. Pred njih se postavljaju sve stroži zahtjevi. Kako se kvaliteta izrade elemenata povećava, smanjuju se zračnost između kliznih elemenata, a za to je potrebna bolja filtracija ulja. Nekoć su zračnosti bile od 80 do 100 μm , a danas se traži minimalna finoća filtriranja za čestice do 20 μm , a za sustave sa servo ventilima i do 3 μm . [2]

Posljedice krutih nečistoća u hidrauličkoj tekućini su [2]:

- jače istjecanje ulja zbog lošijeg brtvljenja
- blokiranje rada kliznih dijelova
- promjena karakteristika regulacije protoka
- smanjenje vijeka trajanja hidrauličkih elemenata i cijelog sustava

2.2. Upravljački dio servo sustava

Proporcionalni tlačni ventil

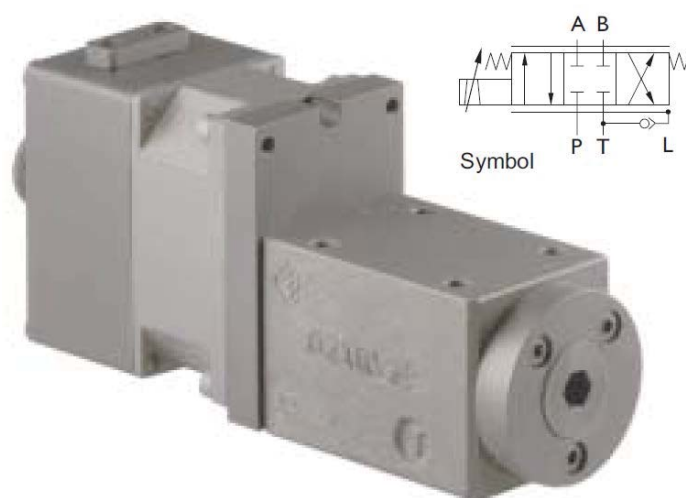
Proporcionalni tlačni ventil se koristi kako bi se simulirao teret na hidrauličkom motoru, tako da pruža otpor crpki koju hidraulički motor pokreće. Korišteni proporcionalni tlačni ventil Atos RZMO-AE-030/210 40 (Slika 2.4) može raditi na maksimalnom reguliranom tlaku $p_{R,\max} = 210 \text{ bar}$ ($2.1 \cdot 10^7 \text{ Pa}$), minimalnom reguliranom tlaku $p_{R,\min} = 2.5 \text{ bar}$ ($2.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$), maksimalnom tlaku tlačnog voda $p_{P,\max} = 315 \text{ bar}$ ($3.15 \cdot 10^7 \text{ Pa}$), maksimalnom tlaku povratnog voda $p_{T,\max} = 210 \text{ bar}$ ($2.1 \cdot 10^7 \text{ Pa}$) te maksimalnom protoku $Q_{\max} = 4 \text{ l/min}$ ($6.67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$). Vrijeme odaziva mu je $\leq 70 \text{ ms}$, histereza $\leq 1.5 \% p_{R,\max}$, linearnost $\leq 3 \% p_{R,\max}$, a ponovljivost $\leq 2 \% p_{R,\max}$. Raspon ulaznog signala je $0 \div 10 \text{ V}$.



Slika 2.4 Proporcionalni tlačni ventil *Atos* serije *RZMO*

Servo ventil

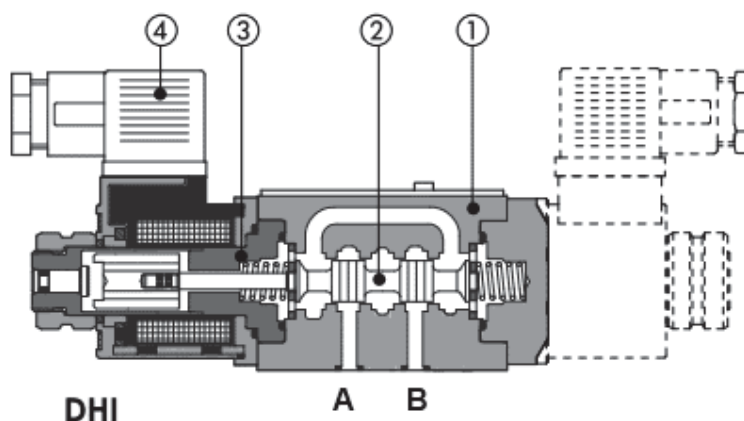
Izvršni član ovog sustava je servo ventil, jer mora biti precizan, ponovljiv, brz i pouzdan. Korišteni servo ventil (Schneider HVM 061, Slika 2.5) pri nazivnom padu tlaka $p_N = 70$ bar ima protok $Q_N = 5$ l/min. Raspon ulaznog signala je ± 10 V, od čega se koristi samo dio od 0 do 10 V, jer se drugi dio skale koristi za protok u suprotnom smjeru.



Slika 2.5 Servo ventil *Schneider HVM 061*

Elektromagnetski ventil 4/2

Elektromagnetski ventil 4/2 se, kao što je već spomenuto, koristi kao osiguranje protiv havarije. Na njegov ulaz dovodi se signal koji se vremenski namjesti da se uključuje i isključuje po potrebi programa koji se izvršava. U programu je namješteno da se prvo uključuje elektromagnetski ventil 4/2, a zatim frekvenijski pretvarač. Isključuju se istim redoslijedom. Korišteni elektromagnetski ventil 4/2 je Atos DHI-0 63 1/2 /A (Slika 2.6) koji može raditi sa protokom do 60 l/min ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$) i tlakom to 350 bar ($3.5 \cdot 10^7 \text{ Pa}$). Uključuje se na 24 V, pa je u elektroničkom ormaru potrebno imati ugrađen odgovarajući relej.



Slika 2.6 Presjek serije *DHI* elektromagnetskih ventila proizvođača *Atos*

Kuglaste slavine

Kuglaste slavine služe kao prenosnice ulja tako da se zaustavi protok ulja kroz elemente s kojima su spojene paralelno. Jedna kuglasta slavina je spojena paralelno sa servo ventilom zbog toga što su predviđena dva načina regulacije: promjenom protoka kroz servo ventil i promjenom frekvencije na frekvenijskom pretvaraču. U slučaju korištenja servo ventila, kuglasta slavina je zatvorena, pa je omogućen protok ulja kroz servo ventil. U tom slučaju frekvencija na frekvenijskom pretvaraču je konstantna $f_{\text{pretv.}} = 50 \text{ Hz}$. U slučaju da se koristi promjenjiva frekvencija frekvenijskog pretvarača ($f_{\text{pretv.}} = 0 \div 50 \text{ Hz}$), kuglasta slavina se otvara kako bi svo ulje prolazilo kroz nju (najmanji otpor strujanju).

Druga kuglasta slavina spojena je paralelno sa proporcionalnim tlačnim ventilom. Otvara se kada se testira upravljanje sustavom, u slučaju da se ne izvodi simulacija tereta pomoću proporcionalnog tlačnog ventila. Tek kada sustav radi kako bi trebao raditi bez tereta, tada se ta kuglasta slavina zatvara i po potrebi se uključuje proporcionalni tlačni ventil pomoću analognog izlaza na upravljačkom uređaju.

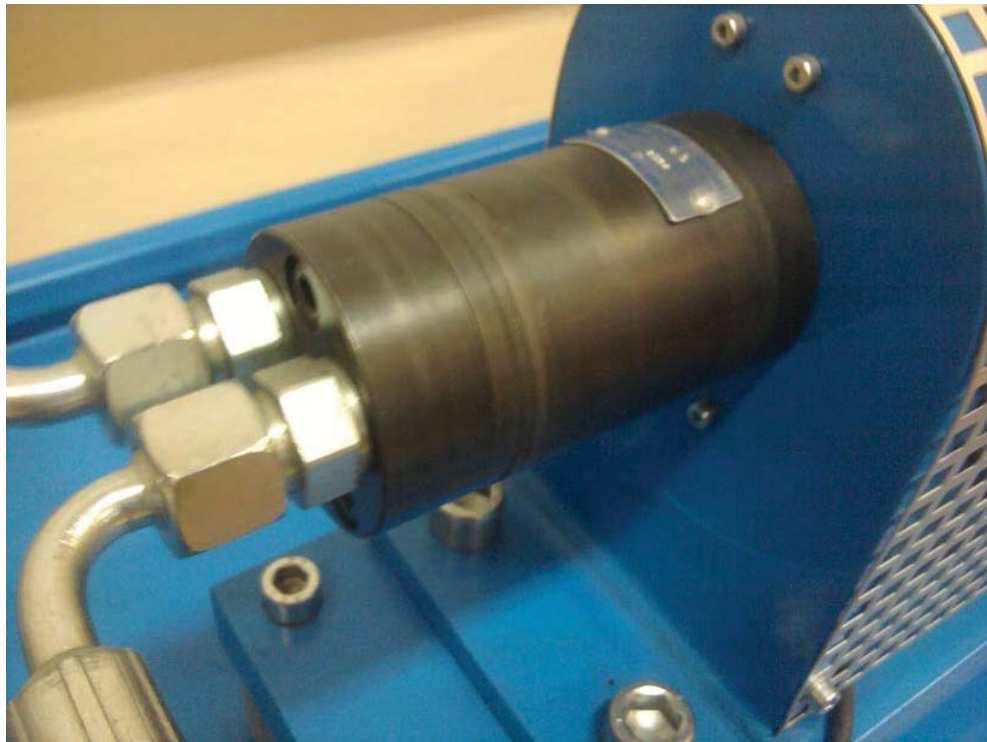
Sigurnosni ventil

Sigurnosni ventil je tlačni ventil za ograničenje tlaka. Priključen je paralelno sa glavnim vodom, ograničava radni tlak tekućine na tlak namješten na vijku s oprugom. Na korištenom sigurnosnom ventilu radni tlak tekućine je namješten na $p_1 \cong 180 \text{ bar} = 180 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

2.3. Izvršni dio servo sustava

Hidraulički motor

Hidromotor koji je korišten u ovom radu (LöSi HK-EPMM 008 C, Slika 2.7) ima specifični protok $v_{\text{HM}} = 13.05 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{rad}$, nazivnu brzinu $n_{\text{HM,N}} = 1950 \text{ okr/min}$, maksimalni okretni moment $T_{\text{max}} = 11 \text{ N m}$, maksimalni protok $Q_{\text{HM,max}} = 2.67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 16 \text{ l/min}$ te maksimalni radni tlak $p_{\text{max}} = 10^7 \text{ Pa} = 100 \text{ bar}$.



Slika 2.7 Hidromotor *LöSi HK-EPMM 008 C* ugrađen u sustav

Dodatna hidraulička crpka

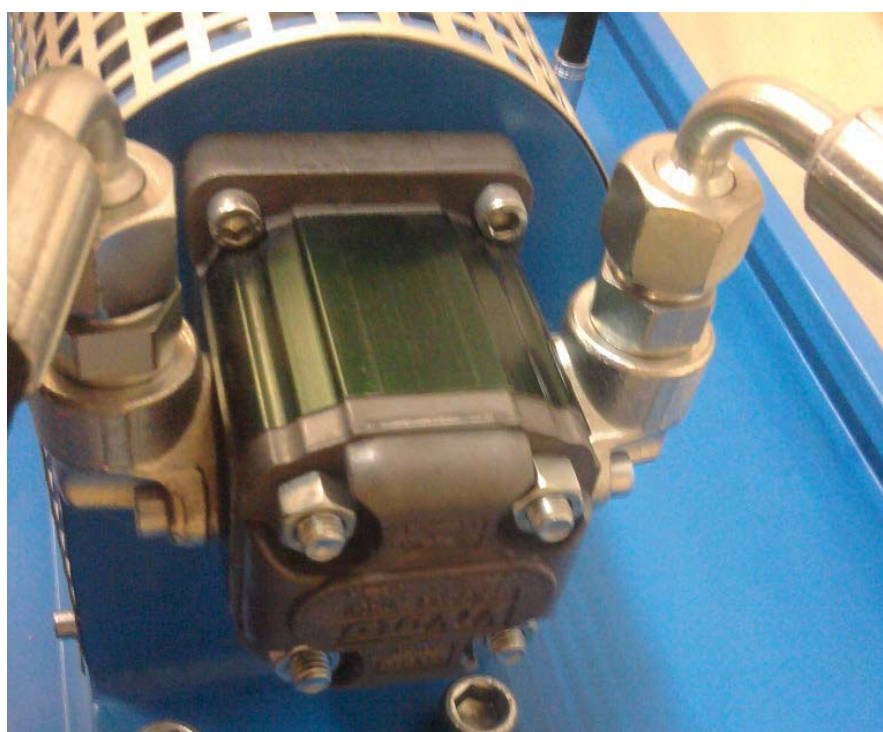
Dodatna hidraulička crpka koristi se za terećenje hidrauličkog motora. Koristi se crpka XV-1P/2.6 proizvođača ViVOLO (Slika 2.8 i Slika 2.9). Crpka ima specifični protok $v_{DC} = 2.6 \text{ cm}^3/\text{okr}$, što bi kada se uvrsti u izraz za protok

$$Q_{DC, \max} = v_{DC} \cdot n_{HM, N} = 2.6 \frac{\text{cm}^3}{\text{okr}} \cdot 1950 \frac{\text{okr}}{\text{min}} = 5070 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} = 5.07 \frac{\text{l}}{\text{min}} \quad (2.2)$$

značilo da bi teoretski maksimalni protok te crpke za maksimalnu brzinu vrtnje pogonskog hidrauličkog motora iznosio 5.07 l/min, odnosno $8.45 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.



Slika 2.8 Hidraulička crpka ViVOLO serije XV-1P



Slika 2.9 Hidraulička crpka za terećenje ugrađena u sustav

2.4. Mjerni dio servo sustava

Senzori tlaka

Korišteni senzori tlaka (Siemens Sytrans P serie Z Typ 7MF1564 250, Slika 2.10) rade na tlakovima od 0 do 250 bar ($2.5 \cdot 10^7$ Pa) i na izlazu generiraju napon od 0 do 10 V.



Slika 2.10 Senzor tlaka Siemens Sytrans P serije Z

Manometri

Manometri u ovom sustavu služe za nadzor tlakova u sustavu i za namještanje parametara određenih hidrauličkih elemenata u sustavu, npr. namještanje tlaka na sigurnosnom ventilu ili za određivanje reda veličine mjerne jedinice na senzoru tlaka i sl.

Inkrementalni davač impulsa (enkoder)

Inkrementalni enkoder služi za mjerenje brzine vrtnje na principu brojanja zareza na neprozirnoj ploči pomoću izvora svjetlosti i foto-senzora (foto-dioda ili foto-tranzistor). Dok svjetlost prolazi kroz zarez, foto-senzor na izlazu daje logičko stanje „1“, a dok se reflektira od ploče, na izlazu daje logičko stanje „0“. Brzina se dobiva proračunom broja impulsa po jedinici vremena. Taj zadatak obavljaju CompactRIO i modul NI 9401. Koristi se inkrementalni enkoder sa 1024 izreza po okretaju, međutim, koristi se i sklop koji povećava rezoluciju 4 puta (položaj prekidača X4), pa konačan broj impulsa po okretaju iznosi 4096.

2.5. Upravljački uređaj NI CompactRIO

CompactRIO je upravljački uređaj baziran na FPGA (Field Programmable Gate Array) tehnologiji. FPGA čip je u principu integrirani krug kojeg sačinjavaju stotine tisuća integriranih programabilnih logičkih sklopova. Logički sklopovi su najjednostavnija I, ILI, NI, NILI (AND, OR, NAND, NOR) vrata, čijom je višestrukom kombinacijom moguće izvesti složene algoritme. FPGA integrirani krugovi se uobičajeno programiraju u VHDL ili Verilog programskim jezicima. Međutim, kako je njih teško savladati, što zahtijeva dosta vremena, umjesto učenja ovih programskih jezika prikladnije je iskoristiti postojeće rješenje i uložiti vrijeme i napore u sustav na kojem se radi, a ne na program. Tvrtka National Instruments u svoje uređaje ugrađuje FPGA integrirane krugove te njihovo programiranje prilagođava svojim korisnicima, tako da razvija LabVIEW programsku platformu da pretvara LabVIEW kôd u VHDL kôd. Obzirom da je LabVIEW intuitivan programski jezik koji se brzo uči, njegovom kombinacijom sa brzom FPGA tehnologijom mogu se postići vrhunski rezultati.

FPGA integrirani krug nije općenit pojam, kao što su npr. logička vrata, tj. postoje deseci, ako ne i stotine, različitih FPGA integriranih krugova. Tri su poznata proizvođača FPGA krugova: Altera, Xilinx i Lattice. National Instruments u svoje CompactRIO uređaje ugrađuje Xilinx FPGA integrirane krugove. Prve generacije CompactRIO uređaja bile su bazirane na Xilinx Spartan 3 obitelji FPGA integriranih krugova, međutim, kako tehnologija napreduje i kako se razvijaju naprednije strukture FPGA integriranih krugova, stare platforme se napuštaju i razvija se sučelje za nove i bolje FPGA integrirane krugove. Najnovije generacije bazirane su na Xilinx Virtex-5 obitelji FPGA integriranih krugova.

Korišteni CompactRIO 9076 (Slika 2.11), baziran je na Xilinx Spartan-6 obitelji FPGA integriranih krugova, što znači da nije najbolji u klasi (Virtex ima više ugrađene memorije i veću brzinu izvršavanja). CompactRIO 9076 ima minimalno 512 MB nepromjenjive memorije, 256 MB systemske memorije, 54576 bistabila, 27288 6-ulaznih LUT-ova (LookUp Tables – tablice s podacima, npr. tablica množenja), 2088 kbit-a block RAM-a (blokovi memorije sa nasumičnim pristupom) i 5 DMA (Direct Memory Access) sabirnica. Takt unutrašnjeg procesora je 400 MHz. [3]



Slika 2.11 Upravljački uređaj *NI CompactRIO 9076*

Za interakciju sa senzorima i aktuatorima koriste se ulazni i izlazni moduli. Kako bi se očitali signali sa senzora tlaka, potreban je analogni ulazni modul. Za tu svrhu korišten je modul NI 9221 (Slika 2.12). NI 9221 sadrži 8 analognih ulaza na koje se sa senzora može spojiti 8 analognih signala sa masom, odnosno 4 diferencijalna analogna signala. Mjerno područje nalazi se u rasponu ± 60 V, što nije adekvatno za ovaj sustav jer se koristi samo dio mjerne skale (od 0 do 10 V). Nažalost, modul koji bi odgovarao sustavu (NI 9215) nije bio dostupan, pa bi zamjenski NI 9221 trebao odraditi isti posao. Na ovom sustavu korištena su dva senzora tlaka, koji imaju izvode mase, pa su korištena dva analogna ulaza.

Da bi se upravljalo proporcionalnim tlačnim ventilom i servo ventilom (u drugoj varijanti frekvencijskim pretvaračem), potrebni su analogni ulazi. Taj zadatak obavlja modul NI 9263 (Slika 2.13). NI 9263 sadrži 4 analogna izlaza u rasponu ± 10 V, od kojih se koriste samo dva. Mogla bi se koristiti i tri izlaza, posebno za servo ventil, posebno za frekvencijski

pretvarač, ali obzirom da su i servo ventil i frekvencijski pretvarači izvršni članovi na koje se spaja izlaz regulatora, odabir između njih se obavlja pomoću mehaničke sklopke.

Kako bi se moglo upravljati binarnim elementima, što su u ovom slučaju elektromagnetski ventil i relej za uključivanje frekvencijskog pretvarača, potrebno je također imati digitalne izlaze. Za tu zadaću koristi se modul NI 9474 (Slika 2.14). NI 9474 ima 8 ugrađenih digitalnih izlaza podesivih od 5 do 30 V.

Da bi se mogla izvoditi regulacija, potrebno je mjeriti brzinu vrtnje motora, s obzirom da je predviđena regulacija po brzini vrtnje. Kako danas taj zadatak najbolje odraduju inkrementalni enkodери, odnosno dаvаči impulsa, potrebno je izvesti prihvаt tаko brzog signаlа. Zа tu nаmjenu služi modul sа High Speed (brzim) digitalnim ulаzimа NI 9401 (Slika 2.15). NI 9401 imа 8 digitalnih ulаzа nаpоnа visokог logičkog stаnjа od 5V koji se dаju prenаmijeniti. U postаvkаmа modula vrlo je jednostаvno pretvoriti ih u brojаče. Međutim, kаko je CompactRIO uređаj bаziran nа FPGA tеhnologiji, mogućе je pоmoću signаlа brojаčа odrediti frеkvenciju, odnosno, broj okretаjа pо sekundi, bez ikаkvog programskog uzorkovаnjа i pretvorbe. CompactRIO uzorkovаnje i pretvorbu obаvljа u sebi, te u proračun šаlje realni broj, u regulacijsku petlju spаjа nа isti nаčin kаo što bi se spаjаo i аnаlogni signаl.



Slika 2.12 Analogni ulazni modul *NI 9221*



Slika 2.13 Analogni izlazni modul NI 9263



Slika 2.14 Digitalni izlazni modul NI 9474



Slika 2.15 Digitalni ulazni modul NI 9401 (sa brojačima impulsa)

2.6. Upravljačko računalo

Upravljačko računalo mora imati instaliran LabVIEW, verzije 2011 ili novije. Uz LabVIEW mora također imati instaliran FPGA Module i Real-Time Module te PID Toolkit. Kako bi se program izrađen u LabVIEW-u mogao prebaciti na CompactRIO, potrebno je imati instalirane NI Scan Engine 4.0 pogonski driver.

CompactRIO je sa upravljačkim računalom povezan preko Ethernet kabla, gdje je računalo poslužitelj (Server), a CompactRIO klijent (Client). Preko Ethernet kabla izvršava se i programiranje i razmjena podataka pri nadzoru, vizualizaciji i regulaciji.

2.7. Konačna konstrukcija sustava

Sustav (Slika 2.16) je izveden kao metalni stol na kojem se nalaze hidraulički motor i dodatna hidraulička crpka, a ispod kojeg se nalaze ostali hidraulički elementi. Elektronički ormar je namontiran na vanjsku stranu stola.



Slika 2.16 Modul rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava

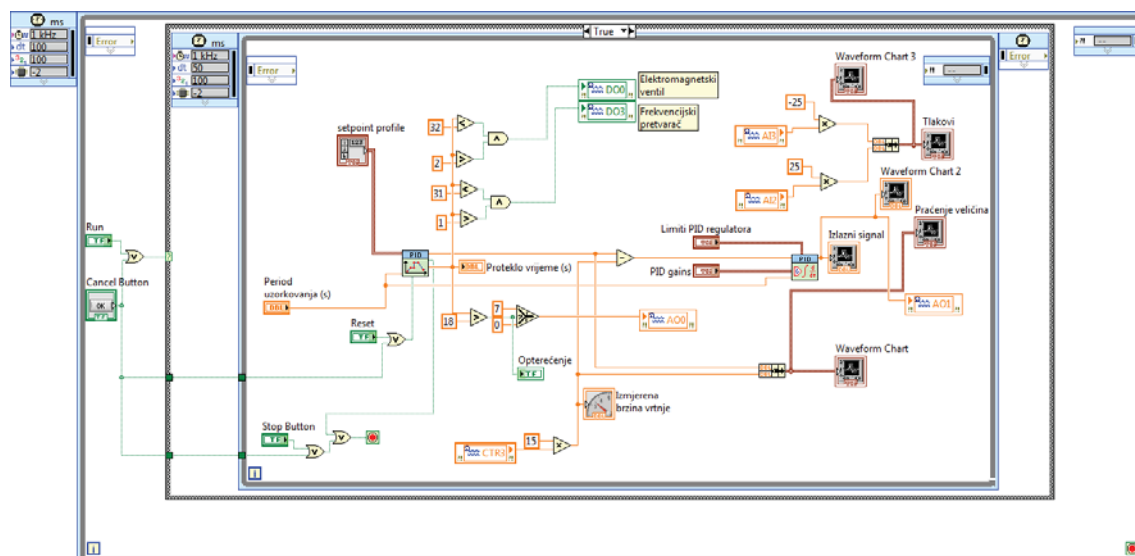
3. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

U ovom poglavlju opisuje se izrada upravljačkog programa i prikazuju se eksperimentalni rezultati ispitivanja. U svrhu završnog rada ispitivanje je provedeno na modulu rotacijskog elektro-hidrauličkog servo sustava. Zadatak je bio izvesti regulaciju brzine vrtnje hidrauličkog motora.

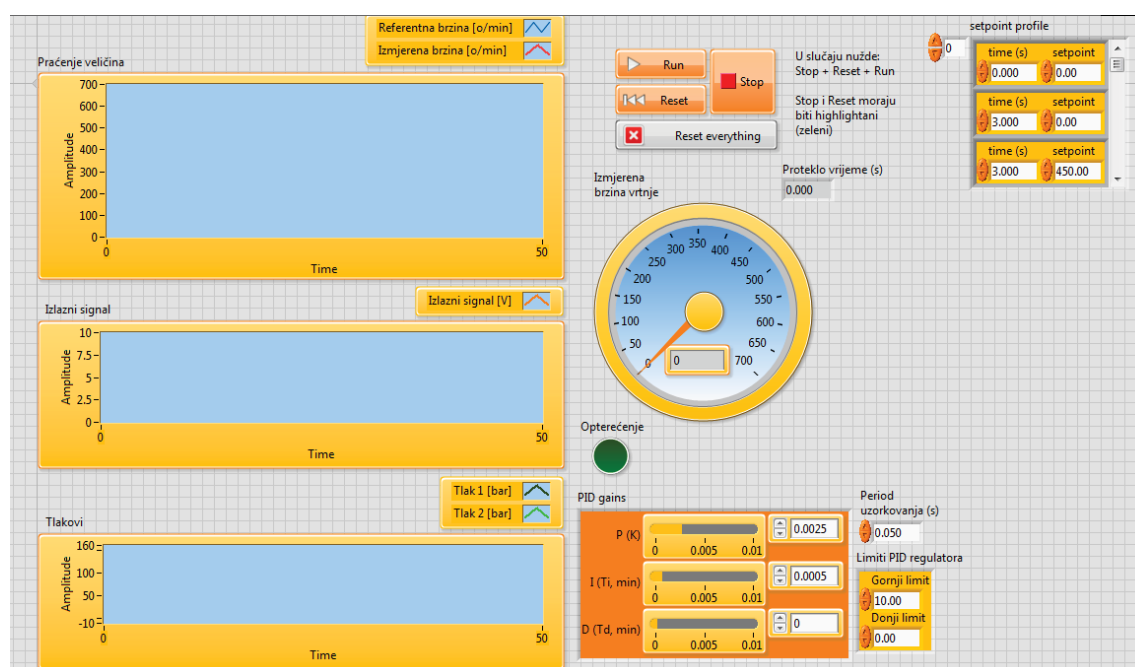
Regulacija se izvodi tako da se na upravljačkom računalu zada polje vrijednosti referentnih brzina i polje vremena kada bi se te referentne brzine trebale zadati. Kombinacijom tih dvaju polja dobije se dijagram oblika odskočne (step) funkcije (vrijeme na apscisi, referentna brzina na ordinati). Taj referentni signal se šalje na ulaz sumatora. Na drugi ulaz sumatora, u obliku negativne povratne veze dolazi skalirani signal sa informacijom o broju okretaja motora. Signal koji izlazi iz sumatora dolazi na ulaz programski definiranog PID bloka. Signal koji izlazi iz PID bloka šalje se na analogni izlaz koji pokreće elektromagnet na servo ventilu. Servo ventil tada, ovisno o analognom signalu sa upravljačkog uređaja, mijenja protok kroz sustav i tako mijenja brzinu vrtnje hidromotora. Na izlaznoj osovini se nalazi inkrementalni enkoder koji dalje šalje signal na High Speed digitalni ulaz koji na CompactRIO uređaju signal sa informacijom o broju impulsa pretvara u frekvenciju i tako se regulacijski krug zatvara.

3.1. Izrada upravljačkog programa

Upravljački program (VI) sastoji se od dva dijela: korisničkog sučelja (Slika 3.1) i blok dijagrama (Slika 3.2). Oba dijela se izrađuju istovremeno, tako da je svaki element grafičkog sučelja vidljivo povezan sa odgovarajućim blokom u blok dijagramu.



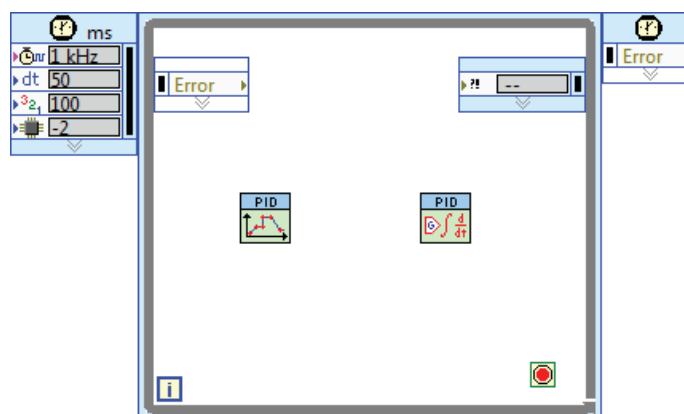
Slika 3.1 LabVIEW blok dijagram



Slika 3.2 LabVIEW korisničko sučelje

Prvo je potrebno napraviti vremensku „While“ petlju (Slika 3.3), jer je to tip petlje u kojoj „Real Time sustavi“, kao što je CompactRIO, izvršavaju kôd. Vrijeme uzorkovanja je namješteno na $T_{\text{Sampling}} = 50 \text{ ms}$ zbog toga što „bufferi“ grafova u LabVIEW-u pamte 1024 stanja, pa je ukupno maksimalno vrijeme simulacije 50 s. Daljnjim testiranjem došlo se do zaključka da manja vremena uzorkovanja ne popravljaju odaziv, pa je prihvaćena vrijednost od 50 ms.

Nakon stvaranja petlje, ugrađuju se blokovi iz „PID Toolbox-a“ (Slika 3.3). Prvi blok (lijevo) prikazuje generiranje reference. Da bi se taj blok potpuno definirao potrebno mu je na ulaze dovesti ulazne parametre (Control, Constant), a na izlaze povezati izlaznim parametrima (Indicator). Ulazni parametri su: referentne brzine i vremena kad se aktiviraju (setpoint profile), period uzorkovanja i tipka za reset. Izlazi su mu generirana vrijednost referentne brzine u realnom vremenu, proteklo vrijeme te signal kada je isteklo posljednje vrijeme namješteno pod „setpoint profile“. Drugi blok (desno) označava PID regulator. Njemu je na jedan ulaz potrebno dovesti parametre regulatora (PID gains), na jedan ulaz granice zasićenja (Limits PID regulatora), na jedan ulaz period uzorkovanja, te na jedan ulaz referentnu vrijednost umanjenu za izmjerenu vrijednost. Na izlaz šalje napon koji se šalje na ulaz servo ventila.



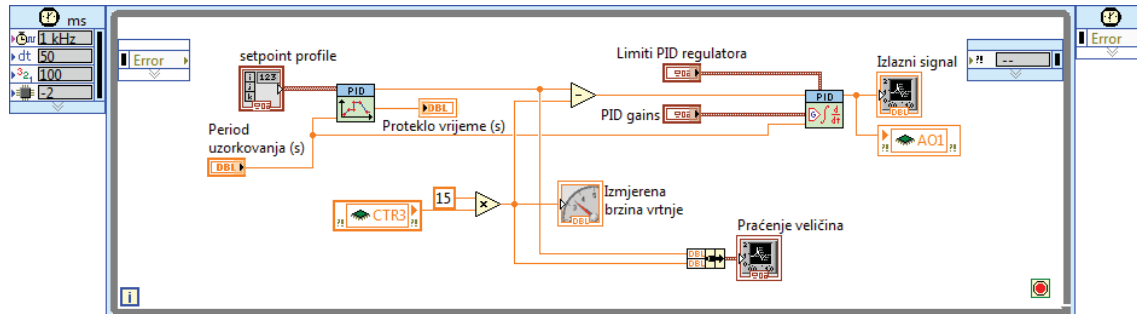
Slika 3.3 Vremenska „While“ petlja sa blokovima iz *PID Toolbox-a*

Sljedeći korak je napraviti regulacijsku petlju (Slika 3.4). Definirani su parametri regulatora (Tablica 1), limiti regulatora (0 do 10 V), te je izlaz bloka za generiranje reference preko člana za

oduzimanje povezan sa regulatorom preko ulaza za referencu. Izlaz regulatora spaja se na AO1 pin CompactRIO uređaja koji se zatim spaja na servo ventil. Izlaz regulatora također se spaja na grafički prikaz (Izlazni signal) kako bi ga se moglo prikazati u ovisnosti o vremenu. Sa ulaza CTR3 sa CompactRIO uređaja dolazi signal koji sadrži informaciju o brzini vrtnje hidromotora. Taj signal, kao što je već spomenuto, dolazi sa inkrementalnog enkodera, čija rezolucija pomoću dodatnog sklopa iznosi 4096 impulsa po okretaju. Obzirom da CompactRIO pretvara informaciju o broju impulsa sa brojača u frekvenciju, koja se izražava u hercima (Hz), a u postavkama brojača je namješteno da broj uzoraka po okretaju bude 1000 (zbog otvorene mogućnosti odabira X1 na izlaznom sklopu enkodera), ta frekvencija se mora pomnožiti sa 15 da bi se dobila vrijednost brzine vrtnje u okr/min. Izmjerena brzina i referentna brzina se prate na grafu „Praćenje veličina“.

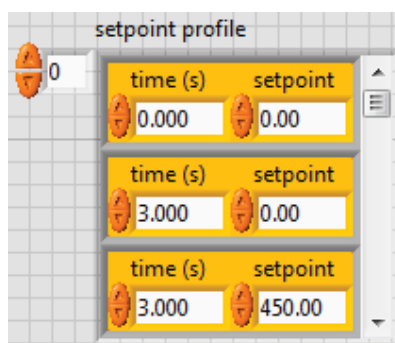
Tablica 1: Parametri regulatora

Parametar regulatora	Vrijednost
P (K)	0.0025
I (T_i , min)	0.0005
D (T_d , min)	0



Slika 3.4 Regulacijska petlja

Nakon toga je potrebno zadati referencu (Tablica 2). Ona se zadaje kao dvodimenzionalno polje gdje su u jednom stupcu zadana vremena, a u drugom referentne brzine (Slika 3.5). Kombinacijom vremena, kao apscise i referentne vrijednosti kao ordinate dobiva se graf (Slika 3.11), na kojem su spojene točke čije su koordinate upravo prvi i drugi stupac polja.

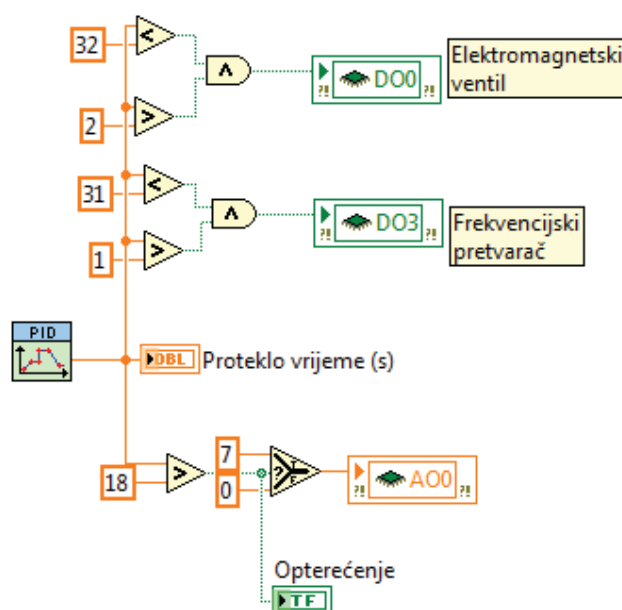


Slika 3.5 Zadavanje reference

Tablica 2: Zadane reference vremena i brzine vrtnje

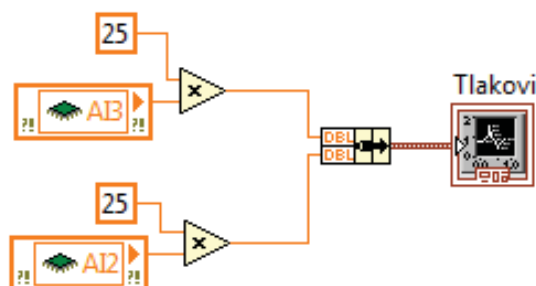
Vrijeme (s)	Brzina vrtnje (okr/min)
0	0
3	0
3	450
6	450
6	300
9	300
9	450
12	450
12	600
15	600
15	200
18	200
18	450
21	450
21	300
24	300
24	450
27	450
27	600
30	600
30	0
33	0

Sljedeće što je potrebno napraviti je dodavanje vremenskih ograničenja u program. Vremenska ograničenja su: vrijeme kada se aktivira frekvencijski pretvarač (1. sekunda), vrijeme kada se aktivira elektromagnetski ventil (2. sekunda), vrijeme kada se uključuje opterećenje (18. sekunda), vrijeme kada se isključuje frekvencijski pretvarač (31. sekunda) te vrijeme kada se isključuje elektromagnetski ventil (32. sekunda). Pinovi na uređaju CompactRIO, kao što je prikazano na slici (Slika 3.6) su spojeni tako da DO0 pripada elektromagnetskom ventilu, DO3 frekvencijskom pretvaraču, a AO0 proporcionalnom ventilu (uključuje se teret, 7 V na ulazu ventila).



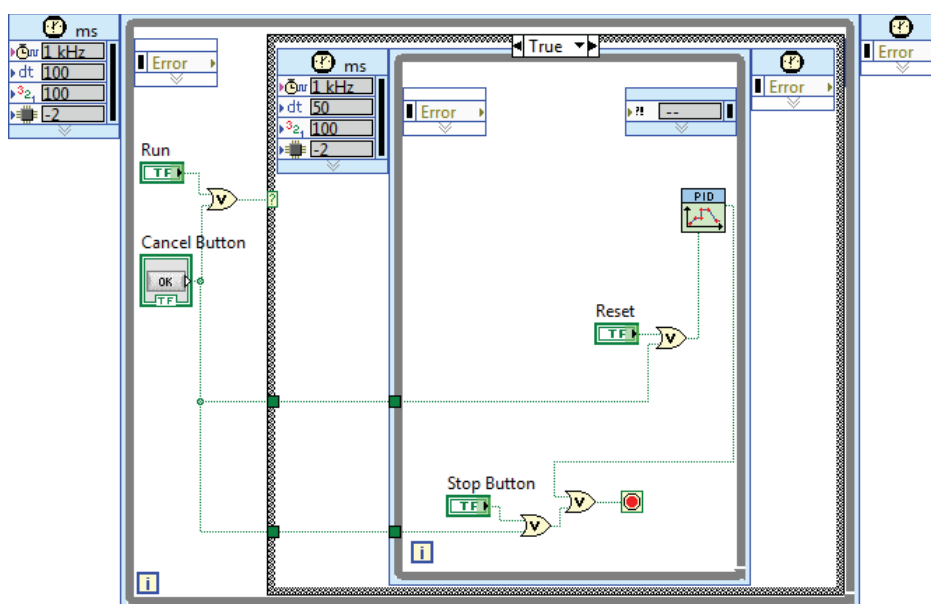
Slika 3.6 Dodavanje vremenskih ograničenja

Dodaje se i prikaz ovisnosti tlakova o opterećenju, pa se izlazi senzora spajaju na pinove AI3 i AI2, nakon čega se iznosi napona sa senzora množe sa 25 zbog toga što ti senzori mjere tlakove od 0 do 250 bar, a izlazni naponi su im od 0 do 10 V, što znači da im je razlučivost 25 bar/V. Tlakovi se prikazuju na zasebnom grafu (Slika 3.2).



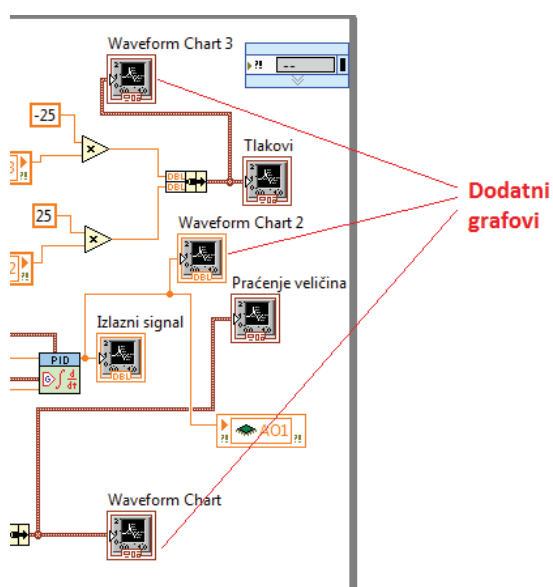
Slika 3.7 Spajanje signala sa senzora tlaka

Nakon što je izrađen program regulacijskog kruga i prikaza, potrebno je cijeli program prilagoditi korisniku. Izrađuje se sučelje preko tipki koje aktiviraju i deaktiviraju različite razine kôda. Tipka „Run“ pokreće cijeli program, tako da pokreće „If“ petlju, koja se u LabVIEW-u zove „Case structure“. Ako je tipka Run pritisnuta, „Case structure“ se nalazi u stanju „True“, u kojem se nalazi cijeli kôd. U stanju „False“ ne nalazi se ništa, pa se ne izvršava nikakav kôd. Tipka „Stop“ zaustavlja unutarnju vremensku petlju, pa ako se ponovno pritisne tipka „Run“, program se može nastaviti. Međutim, ako se pritisne tipka „Reset“, PID blok za generiranje referenci se vraća u početni položaj, pa ako se ponovno pritisne tipka „Run“, program kreće ispočetka. Konačno, tipka „Cancel button“, na kojoj u grafičkom sučelju piše „Reset everything“ trenutno zaustavlja program, resetira ga, te isključuje sve izlaze koji su ostali uključeni. Ta tipka se koristi kao sigurnosna tipka u slučaju nepredviđenih okolnosti (Panic button) ili nakon izvođenja programa za isključivanje svih izlaza koji su slučajno ostali uključeni. Postupak je pokazan na slici (Slika 3.8).



Slika 3.8 Stvaranje tipki na različitim razinama kôda

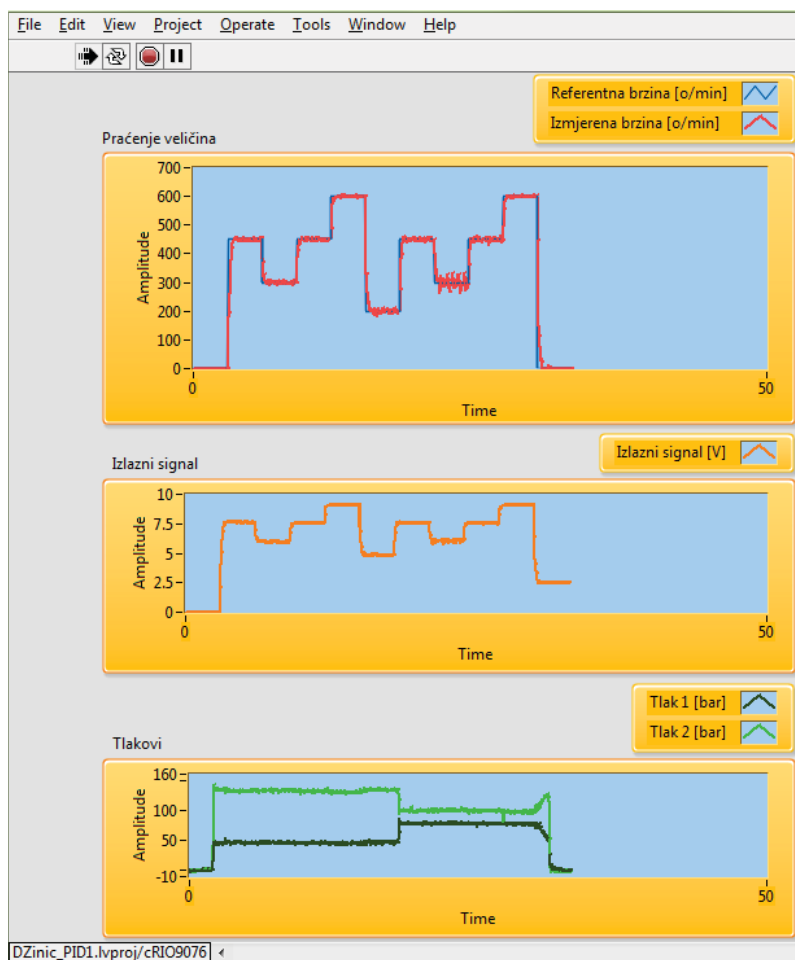
Na posljepku, za prikaz rezultata, ugrađuju se dodatni grafovi za vidljiviji prikaz rezultata (Slika 3.9). Oni nisu vidljivi na korisničkom sučelju, već je potrebno radno područje pomaknuti ulijevo



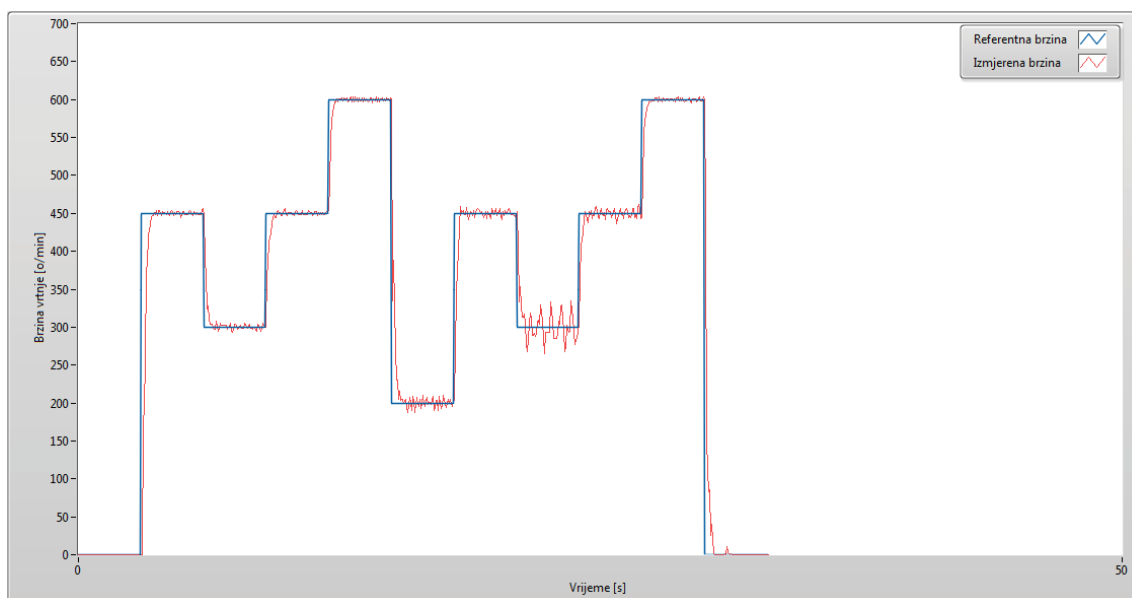
Slika 3.9 Dodatni grafovi za vidljiviji prikaz rezultata

3.2. Rezultati ispitivanja

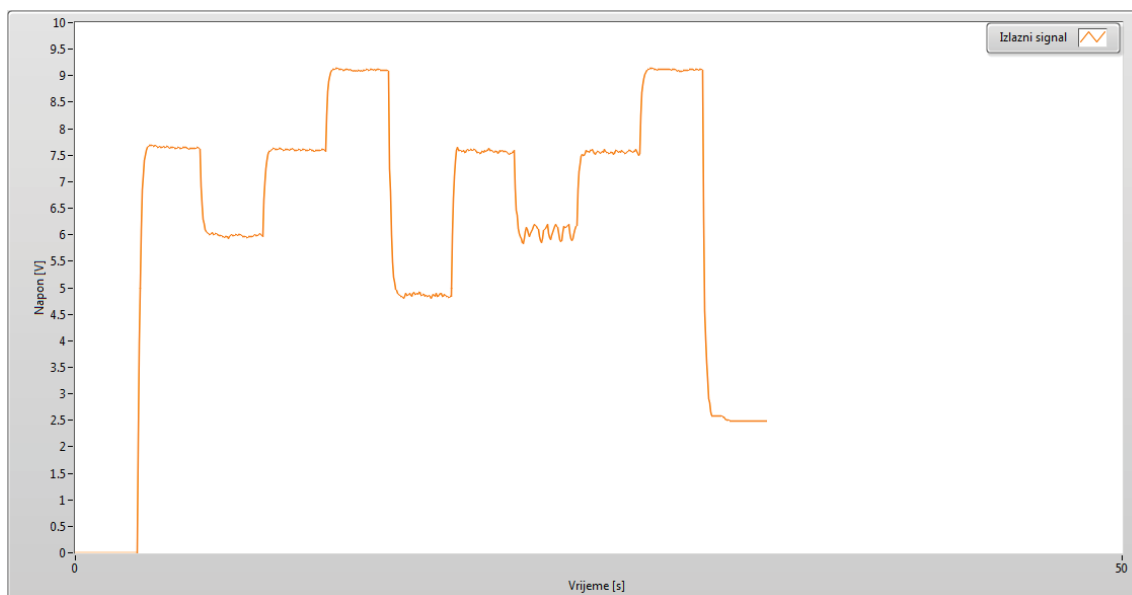
U ovom poglavlju su grafički prikazani rezultati ispitivanja. Vidljivo je da hidraulički motor dobro prati krivulju referentnih brzina, međutim s oscilacijama (Slika 3.10 i Slika 3.11). Pri uključenom opterećenju oscilacije su veće, naročito pri maloj brzini vrtnje. Također je vidljiva promjena tlakova na izlazima crpki s uključenjem tereta (Slika 3.10 i Slika 3.13).



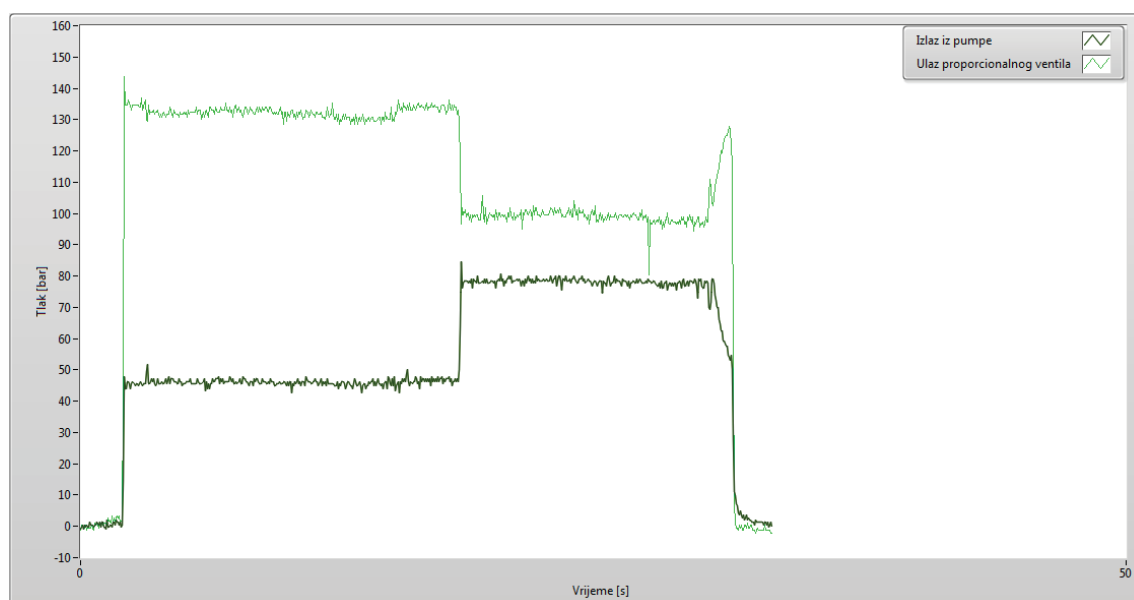
Slika 3.10 Grafičko sučelje nakon izvršenog programa



Slika 3.11 Odaziv u odnosu na referentnu brzinu



Slika 3.12 Oblik izlaznog signala iz regulatora



Slika 3.13 Ponašanje tlakova u ovisnosti o opterećenju

4. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu opisana je regulacija brzine vrtnje hidrauličkog motora pomoću upravljačkog uređaja CompactRIO, baziranog na FPGA tehnologiji, korištenjem *PID Toolbox-a* unutar programskog jezika LabVIEW.

Korišteni CompactRIO kontroler spada u skupinu PAC (Programmable Automation Controller) upravljačkih uređaja, koji kombinira značajke i funkcionalnost PC-a s pouzdanošću i robusnošću PLC-a (Programmable Logic Controller) u jedinstvenom uređaju. PAC kontroleri mogu odgovoriti zahtjevima suvremenih industrijskih procesa u kojima se traži primjena naprednih regulacijskih tehnika, postupci brzog uzorkovanja i procesiranja podataka, daljinsko upravljanje i nadzor procesa, povezivanje različitih procesa putem zajedničke mreže, mogućnosti proširenja procesa drugim modulima itd. Korištenje tradicionalnih PLC uređaja za ostvarenje ovih zadataka može biti vrlo zahtjevno ili čak neostvarivo. Programiranje uređaja CompactRIO pomoću grafičkog programa LabVIEW je intuitivno i relativno jednostavno te se unutar sučelja LabVIEW programa jednostavno prikazuju rezultati u realnom vremenu.

Parametri regulatora dobiveni su eksperimentalnim putem. Na slijeđenju krivulje brzine vidljivo je kako se pojavljuju oscilacije oko referentne brzine, međutim te oscilacije su neznatne kod rada s manjim teretima i na velikim brzinama vrtnje. Odaziv na referencu je relativno brz. Također je vidljivo kako dolazi do znatne promjene tlaka na izlazima crpki.

Za poboljšanje karakteristika regulacije sustava potrebno je provesti identifikaciju sustava kako bi se dobio matematički model, na temelju kojeg se može izvesti jedna od metoda traženja optimalnih parametara regulatora.

LITERATURA

- [1] Abduli, R., Ciner, P.: Elektrohidraulički servosistemi, Vojno-izdavački i novinski centar, Beograd, 1986.
- [2] Nikolić, G., Novaković, J.: Pneumatika i hidraulika, Školske novine, Zagreb, 1998.
- [3] National Instruments: cRIO-9075/9076 Operating Instructions and Specifications, National Instruments Corporation, Austin, Texas, 2011.
- [4] Razum, L.: Regulacija sile i položaja cilindra hidrauličke preše, Diplomski rad, FSB, Zagreb 2012.
- [5] Meritt, H.E.: Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons inc., New York, 1967.

PRILOZI

I. CD-R disc